

# 誘導加温法における磁束収束効果を応用した 磁束密度の局所分布制御の研究

藤井邦明 山田外史 池畑芳雄  
環日本海域環境研究センター生体機能計測研究部門

Magnetic Field Distribution Control on Induction Heating Type Hyperthermia Therapy  
by Using Flux Concentration Effect  
K. Fujii, S. Yamada, Y. Ikehata

## 1. はじめに

がん治療の一種に、磁性微粒子を発熱体として用いる誘導加温ハイパーサーミアという治療法が研究されている<sup>(1)</sup>。磁性微粒子を用いた誘導加温法は深部局所加温に適しているが、さらに加温効率を上げるには、励磁周波数や磁束密度を高くするなどの改良を行う必要がある。しかし、現状の誘導加温装置では、体表面における発熱等の負担を軽減するために励磁条件が限られている。

本報告では現状の誘導加温法における励磁条件の問題点の改善法として磁束収束効果<sup>(2)</sup>に着目した。磁束収束効果とは渦電流制御による磁束密度の局所分布制御作用である。図1に示すような穴付導体板にスリットを設けることにより、渦電流の流れがスリットにより阻害され、外環を流れるはずであった渦電流はホールに沿って内環を流れるようになる。内環へと流れを変えた渦電流は、ホール内へ励磁磁束を誘導し、ホール内に磁束密度を収束させ増強する。一方、外環を流れる渦電流は、励磁磁界を打ち消し、板下部における磁束密度を減少させる。この磁束密度の増強、抑制の2つの作用を総合して磁束収束効果と呼ぶ。

本報告では、磁束収束効果を応用することにより、磁性微粒子を含む目標部位に励磁磁束を集中させることによる局所加温を提案する。その評価手法として、誘導加温モデルを用いた励磁磁束の分布制御を行い、磁束密度の増加、抑制効果について評価を行ったので報告する。

## 2. 磁束収束形誘導加温法の原理と評価モデル

### 2.1 励磁コイルによる電界の影響

誘導加温法に用いるアプリケーションとしての励磁コイルの端子間には、約4000 Vの高電圧が印加されている。そのため、コイル端子間には強電界が生じる。周波数が100 kHz~10 MHzまで増加するにつれて、高強度の電磁界の曝露により、生体は発熱する。誘導加温法では、体表面において、誘電体損失などの意図しない発熱などの影響が懸念されている。

誘導加温法では体表面に生ずる電界の影響を軽減するため、体と励磁コイルの間に、ある程度間隔を設けなければならない現状にある。

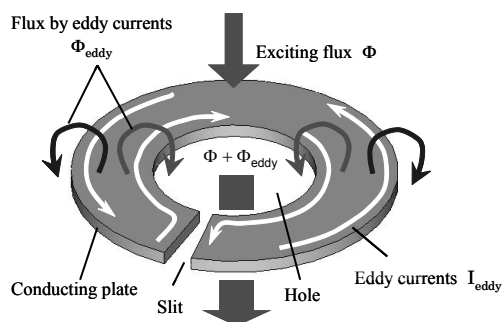


図1 磁束収束効果の原理図

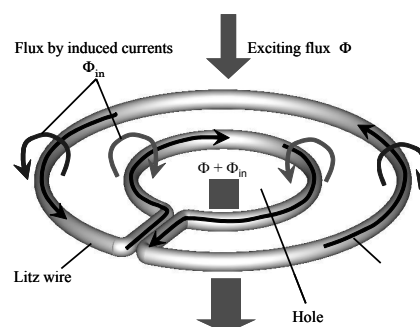


図2 リッツ線を用いた磁束収束用コイル

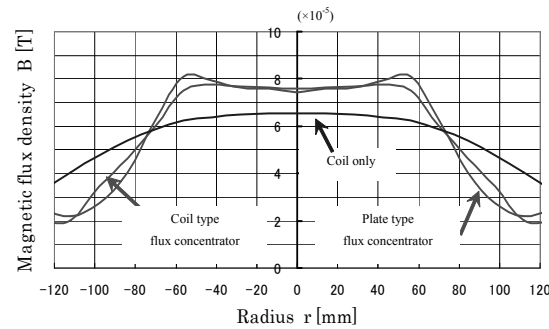


図 3 磁束収束板と磁束収束用コイルの磁束密度分布の比較

## 2.2 磁束収束用コイル

測定には、図1に示す磁束収束板ではなく、図2に示すリッツ線を用いた磁束収束用コイルを用いる。磁束収束用コイルでは、励磁磁束によって渦電流ではなく誘導電流が発生する。この誘導電流の向きをリッツ線の配線によって変えることができ、外環から内環へと変えることによって磁束収束効果を得ている。

リッツ線は表皮効果を低減させるために用いられる導線である。リッツ線を磁束収束用コイルの構成材として用いることにより、冷却が容易となり、磁束収束板と比較して発熱が低減されることが考えられる。

磁束収束板と磁束収束用コイルについて磁束収束効果による分布制御作用の比較を行った。その結果は図3に示すように、磁束密度の抑制効果が若干減少したが磁束密度分布はほぼ同様であった。従って、磁束収束用コイルを用いても磁束収束板とほぼ同様の磁束収束効果を得られることが確認された。

## 2.3 磁束収束形アプリケーション

図4に励磁コイルと体の間に磁束収束コイルを挿入した誘導加温法における磁束収束形アプリケーションを示す。磁束収束用コイルは、外部電源が不要な短絡コイルであるため、移動に制限はない。そのため、磁束収束効果による磁界の照射範囲の移動が容易である。励磁コイルは体表面に密着させることは困難であるが、磁束収束コイルは短絡コイルなので、電界が発生せずに励磁コイルから生じる電界に対してシールドとしての役割も果たすため、体表面に密着させることが可能である。

## 2.4 誘導加温モデル

磁束密度の分布制御を行うにあたって誘導加温モデルを製作した。図5に製作した誘導加温モデルの構成図を示す。誘導加温モデルは、励磁コイルモデル、磁束収束用コイル、3軸サーチコイルによって構成されている。測定は、磁束収束用コイル直下を基準面とし、3軸サーチコイルを移動することにより、磁束収束用コイル近傍および遠方の磁束密度分布を測定し磁束密度の増強、抑制効果を評価する。

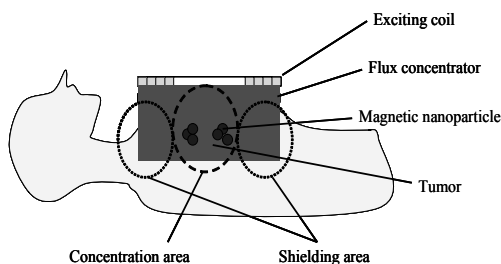


図 4 磁束収束形アプリケーション

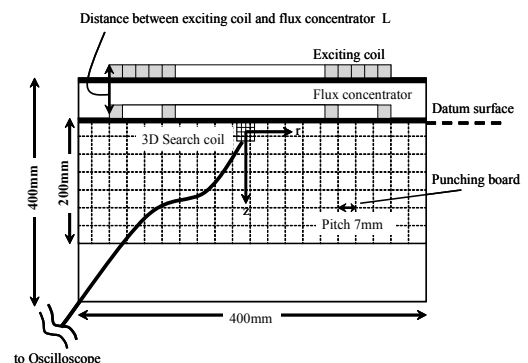


図 5 誘導加温モデルの構成図

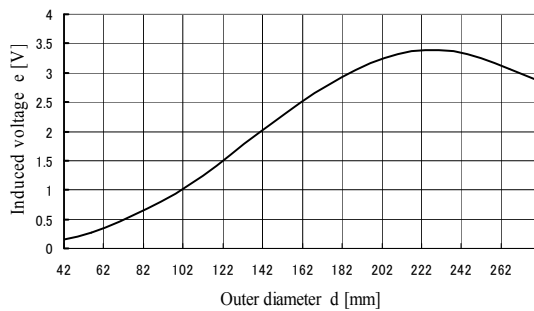


図 6 磁束収束用コイルの外径と誘起電圧の関

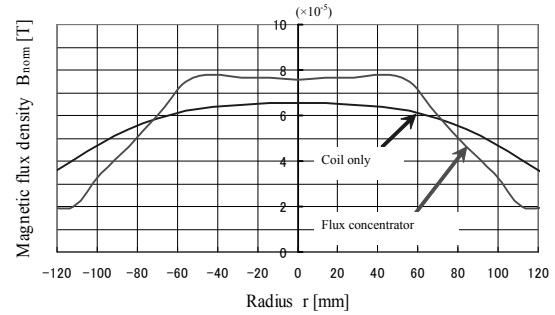


図 7 磁束収束用コイル近傍の磁束密度分布

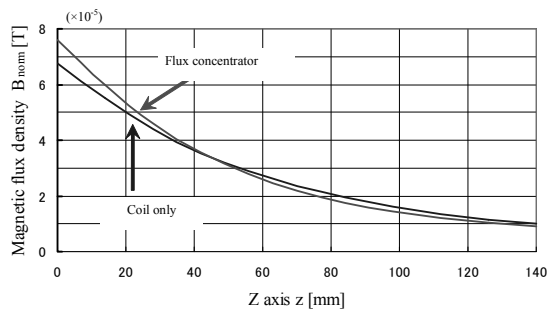


図 8 磁束収束用コイル遠方の磁束密度分

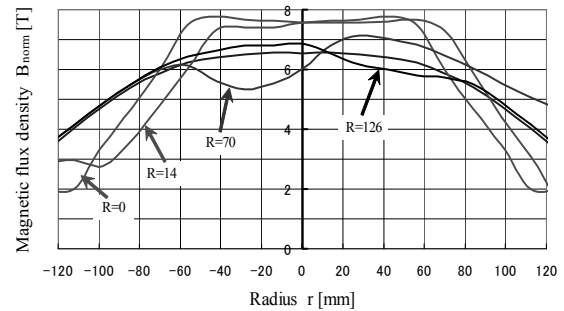


図 9 磁束密度の増強領域の移動範囲

### 3. 磁束収束効果による磁束密度の局所分布制御の評価

#### 3.1 磁束収束用コイルの最適外径の選定

磁束収束用コイルにおいて、鎖交磁束数が最も多く、磁束収束効果が最大となる外環部の径を設定するために、磁束収束用コイルの外径と誘起電圧の関係について検討を行った。結果を図6に示す。誘起電圧が最大となる磁束収束コイルの外径は240 mm近傍であった。この径は励磁コイルの外径とほぼ等しい。鎖交磁束数が最も多くなる磁束収束コイルの外径は励磁コイルの外径と等しい240 mmであることが分かった。

#### 3.2 磁束密度の局所分布制御の評価

##### 3.2.1 磁束収束用コイル近傍および遠方における磁束密度の増減効果

外径240 mm、内径120 mmの磁束収束用コイルを用いて磁束密度の局所分布制御を行い、磁束収束用コイル近傍および遠方における磁束密度の増強および抑制効果の評価を行った。磁束収束用コイル近傍の磁束密度分布を図7に、遠方の磁束密度分布を図8に示す。磁束収束用コイル近傍においては、磁束収束用コイルの内径120 mmの領域において約14 %の磁束密度の増強効果が確認できた。一方、内環部と外環部の間の領域において最大40%の磁束密度の抑制効果が確認できた。また、磁束収束用コイル遠方においては、基準面から約40 mmの磁束収束用コイル近傍に磁束密度の増強が留まった。

##### 3.2.2 磁束密度の増強領域の移動範囲

磁束収束用コイルが磁束収束効果を維持しつつ、移動できる範囲Rについての評価を行った。結果を図9に示す。R = 126 mmの場合において磁束収束効果が完全に失われていることが確認できる。この結果より磁束収束用コイルの移動の限界は励磁コイルの内半径と磁束収束用コイルの内半径の和で得られることが確認できた。

しかし、磁束密度の高い部位を維持しつつ移動できる範囲は数10 mmである。

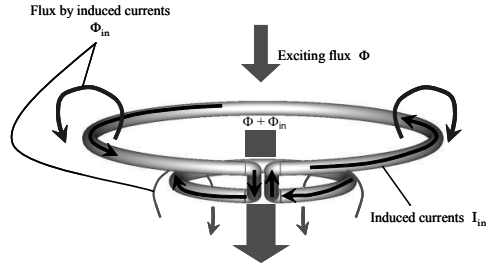


図 10 階層形磁束収束用コイル

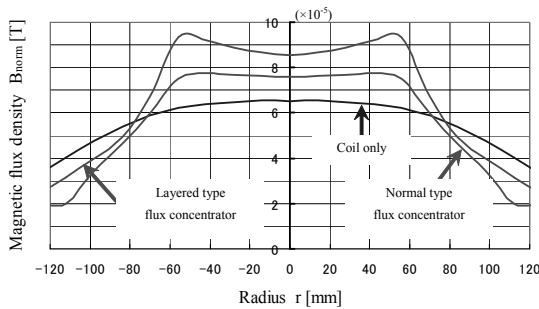


図 11 階層形磁束収束用コイル近傍における磁束密度分布

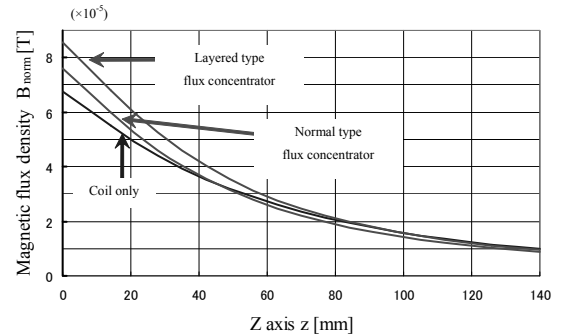


図 12 階層形磁束収束用コイル遠方における磁束密度分布

### 3.3 階層形磁束収束用コイルによる磁束密度の増強

図10に示すように磁束収束用コイルの内環と外環を階層状に構成することにより、磁束収束効果を増加させる階層形磁束収束用コイルを製作し、近傍および遠方における磁束収束効果を評価した。階層形磁束収束用コイル近傍の磁束密度分布を図11、遠方の磁束密度分布を図12に示す。階層形磁束収束用コイル近傍においては通常形と比較して増強効果が14 %増加した。一方、抑制効果は60%減少した。遠方においては、基準面から2倍の80 mmまで増強領域が拡大することが確認できた。また、階層形磁束収束用コイルは、近傍における抑制効果は減少するものの、遠方における増強距離の拡大に対して有効に働くことが確認できた。

## 4. 結論

誘導加温法において、磁束収束効果を用いた磁束密度の分布制御を行い、磁束密度の増強および抑制効果の評価を行った。磁束収束用コイルによる磁束密度の増強および抑制効果は、磁束収束用コイル近傍において有効に働くことが示された。磁束収束用コイルは、数10mm程度の距離ならば磁束収束効果を維持しつつ移動できることが分かった。この結果より、磁界照射範囲の微調整に対して磁束収束コイルが有用であることが示された。

磁束収束用コイルの内環と外環を階層状に構成した階層形磁束収束用コイルを用いることによって、通常形磁束収束用コイルと比較して、遠方における磁束密度の増強効果が増加することが確認された。階層形磁束収束用コイルは、磁束収束用コイル遠方における磁束密度の増強領域を拡大する手法の一つとして有用性が認められた。

## 文 献

- (1) I.Nagano,et.al.: Development of a portable cancer treatment system using induction heating--- A new weapon for killing the cancer---, 2nd Kanazawa Workshop, WAVE11-P15 (2006).
- (2) 別所, 他: 渦電流制御に基づく磁束収束型電磁ポンプとその改良, 日本磁気応用学会誌, 16, 351, 354 (1992).